振动主动控制系统降级工作模式研究

梁昆,李明强,王国胜,苑博

(中国直升机设计研究所,333000 景德镇)

摘　要:振动主动控制系统是通过获取振动传感器信号、驱动作动器施加作动力以降低平台振动水平的机电综合系统。对于振动环境恶劣的装备平台,振动主动控制系统工作的稳定性直接影响平台使用体验。当系统内硬件数量较多时,系统对部件可靠度敏感度较高。为了提高系统功能可靠性,保证装备平台安全,在不改变硬件的前提下,本研究从优化控制策略出发,提出了两种系统降级模式,并对其进行可靠性分析;在降级模式的基础上,基于切换系统方法,针对硬件故障数量的不同设计不同等级的降级模式;针对不同降级模式下系统控制参数,对作动器进行最优组合设计,得到在不同降级模式下系统减振控制的最优高维度模型矩阵;最后在实验室内,基于振动主动控制系统实验环境,针对作动单元降级模式进行了实验验证,通过模拟部件故障状态,验证系统降级工作策略与控制模型优选设计的正确性,提高了系统功能可靠性。

关键词:振动主动控制;降级模式;可靠性分析;实验验证

中图分类号:V240.2　　**文献标志码:**A

chinaXiv:202303.00362v1

Study on degradation mode of the active vibration control system

LIANG Kun,LI Mingqiang,WANG Guosheng,YUAN Bo

(China Helicopter Research and Design Institute,333000 Jingdezhen,China)

Abstract: The active vibration control system is an electromechanical integrated system which can reduce the vibration level of the platform by obtaining the vibration sensor signal and driving the actuator output force. The stability of the active vibration control system directly affects the experience of using the platform which obtains harsh vibrations. The system is highly sensitive to component reliability when the system contains lots of hardware. In order to improve the functional reliability of the system without changing the hardware,this paper proposes two system degradation modes of system control strategies and analyzes their reliability. Based on the system degradation modes and switch methods,different levels of degradation modes are designed according to the different number of hardware faults. According to the system control parameters under different degradation modes,the optimal combination design of the actuator is proposed. And the optimal high-dimensional matrix of system model under different degradation modes is obtained. Finally,in the laboratory,the degradation mode of the actuator is experimentally verified in the active vibration control system test platform. By disconnecting the power supply of the actuator,the system works correctly for the vibration reduce function.

Key words:active vibration control;degradation mode;reliability analysis;experiment verification

收稿日期:2022-03-30　　**修回日期:**2022-04-18

基金项目:陆军装备预先研究项目(No. LZY20190501001)

通信作者:梁昆,工程师。E-mail:liangkun1989@qq.com

引用格式:梁昆,李明强,王国胜,等. 振动主动控制系统降级工作模式研究[J]. 应用力学学报,2023,40(1):81-86.

LIANG Kun,LI Mingqiang,WANG Guosheng,et al. Study on degradation mode of the active vibration control system[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(1):81-86.

ChinaXiv合作期刊

直升机由于旋翼固有的结构动力学特性,具有较大的振动水平。过大的振动影响飞行员的感受与操纵、机载设备的正常工作。国外在直升机设计领域成功采用了振动主动控制技术降低了直升机机体振动水平[1-3]。振动主动控制系统通过传感器采集加速度信号,经过解算后,由作动器产生与之相反的振动,从而实现振动抵消功能[4]。

国内振动主动控制领域已有学者针对振动主动控制律、作动装置、振动控制试验等方面开展了相关研究。在振动主动控制律方面,顾仲权等[5-7]基于直升机开展了频域、时域控制算法的设计与试验,并进行了系统位置优选研究;李嘉全[8]改进了滤波x-LMS算法,提升减振能力;浦玉学等[9]基于Fx-LMS算法开展了变步长自适应算法研究。在振动主动控制作动装置方面,YOUNG 等[10]针对压电作动器进行了振动控制实验;朱明刚[11]针对船舶动力装置研制了基于悬挂弹簧的惯性式作动器;邓景辉等[12]研制了应用于直升机的离心式作动装置,可实现直升机结构的振动控制。

在可靠性研究领域,国内学者针对多余度系统控制开展了深入研究,在容错控制方法、故障检测理论等方面形成一定研究成果。章志伟[13]从控制理论出发,研究了系统失效状态的切换方法和稳定性;张永贤等[14]针对轨道交通提出了多取少系统的控制策略;霍琳等[15]针对飞管系统提出了基于遗传算法的多余度优化方法;沈启坤[16]针对近空间飞行器的传感器故障进行了分析研究;陶元[17]从理论上对线性与非线性系统故障容错控制进行了研究。在不同领域内的可靠性提升与故障监测方法对于通用系统设计有很大借鉴意义。

本研究的研究对象为针对某型直升机研制的振动主动控制系统。系统作动器是可控力的虚拟概念,即两台作动单元需要协调控制输出一个可控力。由于系统内含有数量较多的作动单元,系统整体可靠性随着作动单元数量的增多而大幅降低。为提高振动主动控制系统功能可靠性,保证主动控制系统对直升机减振功能不因部分作动装置故障而丧失,在不改变系统硬件的条件下,本研究开展系统功能可靠性优化研究工作。针对系统硬件组成特点,本研究提出基于作动器故障的降级策略和基于通信总线监控的作动单元故障重组降级策略两种工作策略,结合马尔可夫理论[18]对系统特性进行可靠性的定量分析;针对降级策略,结合切换系统设计思想对振动主动控制系统降级工作模式进行设计,并在实验室内对系统降级工作模式进行实物试验验证。

1 系统降级策略

1.1 基于作动器故障的降级策略

根据系统控制逻辑,当作动器中一台作动单元发生故障时,该作动器便无法正常工作,因此系统可判定该作动器故障进入降级模式。当多作动器故障时,系统根据判断逻辑,依次进入不同级别的降级状态。例如图 1 中,当作动器 A-1 出现硬件故障,则作动器 A 中的两台作动单元均进入停机模式,系统进入缺少作动器 A 的降级模式。

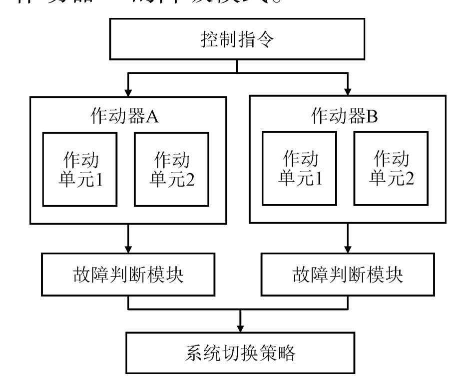


图 1 基于作动器故障的降级控制图

Fig. 1 Control diagram of the 1st degradation mode

此种降级模式下,系统控制模型逻辑较为简单,为二叉树结构的模型切换即可满足系统控制,系统控制传递函数根据不同作动器安装位置内置于系统中,通过故障判断进行控制切换,见图 2。

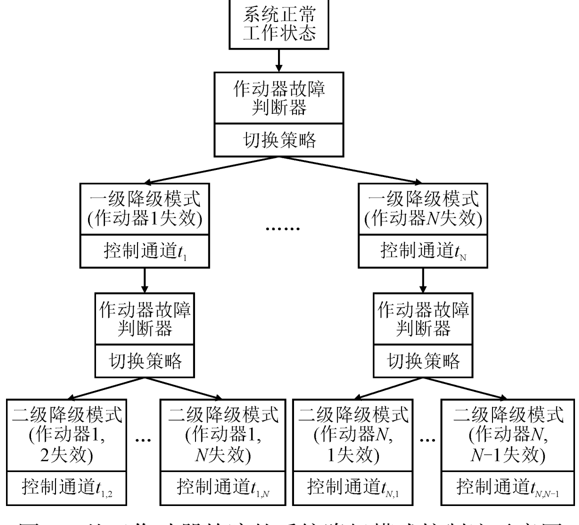


图 2 基于作动器故障的系统降级模式控制流示意图

Fig. 2 Control diagram of the 1st system degradation mode

1.2　基于总线监控的作动单元故障重组降级策略

由于任意两个作动单元均可协调输出可控力，为了进一步提高系统功能可靠性，通过在通信总线上对作动单元的实时运转情况进行监控，打破系统初始阶段对作动单元的协调配对划分，当多台作动单元发生故障时，可由系统对剩余作动单元进行重组配对，实现新的作动输出控制，增强了系统对作动单元故障的适应性。如图 3 所示，假设作动器 A-1 出现故障，此时作动器 A-1 停机，作动器 A-2 运转待命；当作动器 B-1 出现故障时，作动器 A-2 与作动器 B-2 可作为一对作动单元进行协调控制。

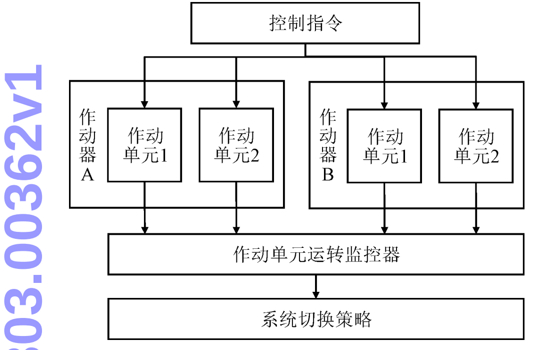


图 3　基于总线监控的作动单元重组降级控制图

Fig. 3　Control diagram of the 2nd degradation mode

此种降级模式下，当作动单元故障数量大于 2 时，系统的可靠性会明显高于第一种降级模式。系统控制中心结合作动单元运转监控器综合实现，由于涉及作动单元协调重组，对于系统切换策略较第一种降级模式更为复杂。

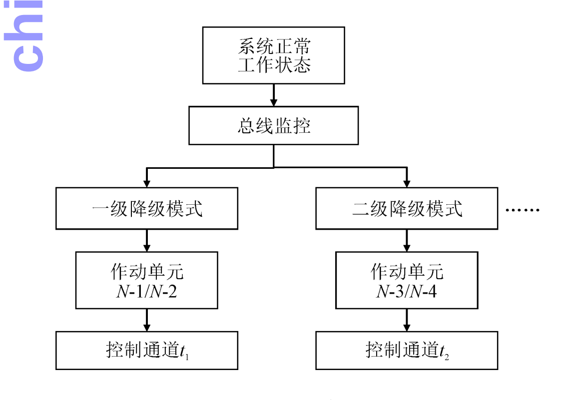


图 4　基于总线监控的系统降级模式控制流示意图

Fig. 4　Control diagram of the 2nd system degradation mode

2　系统功能可靠性分析

功能可靠性是指系统运转过程中可以完成预定功能的概率。对于冗余系统或多设备系统，功能可靠性指标会高于系统可靠性指标。通过上一节分析可以看到，第一种降级模式为故障串行模式，系统高维度降级是在低维度降级的基础上进行判定的，控制模型内置于系统中逐级选择；第二种降级模式利用总线并行信号对降级维度和控制模型进行自适应更新。针对某型振动主动控制系统进行分析，设作动单元故障率为 λ，数量为 N；作动器可靠度 $\lambda_A = 1-(1-\lambda)^2$，数量为 $N/2$。系统功能可靠性指标第一种降级模式为 $\boldsymbol{P}^{\mathrm{I}}(t)$，第二种降级模式为 $\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}(t)$，其中上角标希腊数字为系统根据作动器输出力数量减少而定义的降级级别，如较全系统减少一个输出力时称为一级降级模式等。采用马尔可夫模型随机过程分析方法，对振动主动控制系统两种降级策略进行可靠性建模和分析。

未设计降级时，系统可靠度见式(1)。针对第一种降级策略，以作动器为对象进行分析，一级、二级降级模式下可靠性指标见式(2)、(3)；针对第二种降级策略，以作动单元为对象进行分析，一级、二级降级模式下可靠性指标见式(4)、(5)。

$$\boldsymbol{P}_{S0}^{\bigcirc}(t) = \boldsymbol{R}_{S0}^{\bigcirc}(t) = 1-(1-\boldsymbol{R}(t))^{N} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{P}^{\mathrm{I}}(t) = \boldsymbol{P}^{\bigcirc}(t) + C_{\frac{N}{2}}^{1}\lambda_{A}(1-\lambda_{A})^{\frac{N}{2}-1} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{P}^{\mathrm{II}}(t) = \boldsymbol{P}^{\mathrm{I}}(t) + C_{\frac{N}{2}}^{2}\lambda_{A}^{2}(1-\lambda_{A})^{\frac{N}{2}-2} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{R}^{\mathrm{I}}(t) = \boldsymbol{P}^{\bigcirc}(t) + C_{N}^{1}\lambda(1-\lambda)^{N-1} + C_{N}^{2}\lambda^{2}(1-\lambda)^{N-2} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{R}^{\mathrm{II}}(t) = \boldsymbol{P}^{\mathrm{I}}(t) + C_{N}^{3}\lambda^{3}(1-\lambda)^{N-3} + C_{N}^{4}\lambda^{4}(1-\lambda)^{N-4} \tag{5}$$

使用 MATLAB 对不同降级策略和模式进行编程，假设作动单元个数 $N=10$，作动单元硬件故障率 $\lambda = 0.000\,1$ 次/h，系统运转 3 000 h，绘制系统运转的可靠度曲线。

根据系统功能可靠性模型，绘制出在不同降级策略与模式设计下，系统功能可靠度与运转时间变化的关系图。通过图 5 可以看出，由于作动单元数量多，在无降级模式设计下，系统可靠度随着运转时间快速降低，在第 3 000 h 仅为 2.8%；在 3 000 h 时，第一种降级策略下，具有一级、二级降级设计的系统可靠度分别为 17.5% 和 48.1%，第二种降级策略下，具有一级、二级降级设计的系统可靠度分别为 38.3% 和 85.0%。可以看出，第二种基于通信总线监控的作动单元故障重组降级策略和多级降级模式的设计对于系统可靠性有较大的改善。

chinaXiv:202303.00362v1

ChinaXiv合作期刊

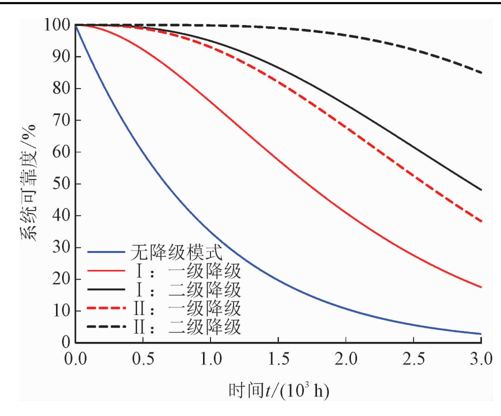


图 5　不同降级策略、模式与系统可靠度关系

Fig. 5　Reliability by different degradation strategies and modes

在降级模式下输出力的数量直接决定着系统减振控制能力和效果。当作动单元故障数量大于一个时，两种降级策略中系统输出力数量变化有所不同，见图 6。第一种降级策略中，由于作动单元故障的偶发性，在同一作动器内和不同作动器内的作动单元发生的故障导致系统作动器故障数量产生较大差异，对于系统控制稳定性影响较大。第二种降级策略中，由于系统输出力是由系统独立控制作动单元进行协调输出的，因此系统输出力数量是可控的，这对于系统的控制稳定性和较低的复杂性有较大优势。

chinaXiv:202303.00621

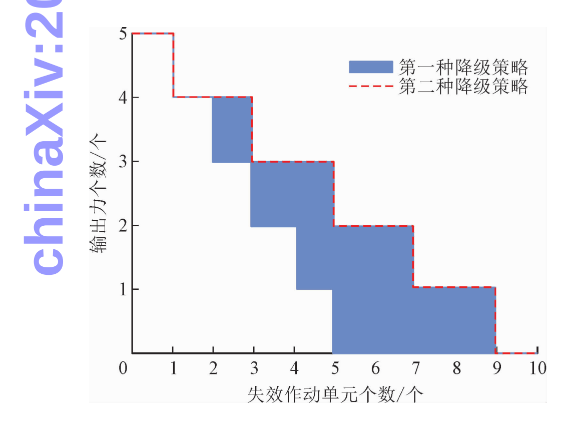


图 6　不同降级模式下系统可输出力个数

Fig. 6　Force num by different degradation modes

在实际系统装机过程中，由于作动单元安装受直升机总体布置的限制，不同作动单元安装位置、距离、方向可能存在一定的差异，因此系统降级策略需要根据不同作动单元装机组合形式、作动单元硬件可靠度、系统可靠性指标要求等因素综合研断。当作动单元安装分散、输出力方向差异较大、作动器硬件可靠度较高时，可优先采用第一种降级策略；当作动单元安装集中、系统对可靠性指标要求较高时，可优先选择第二种降级策略。

3　降级模式下的控制模型

通过上述论证可以看到，设计了多级降级的主动控制系统可靠性有着明显增高。但是，系统降级后，控制模型会发生实时改变。由于不同作动单元数量下的系统控制模型是不同且相互独立的，因此系统采用“切换系统”的控制思想实现不同降级模式下控制模型的转换。“切换系统”的变化决定着系统如何运行。假设系统正常运转时，控制模型为 $\boldsymbol{T}$；当系统作动器发生故障，进入降级模式时，根据失效作动器情况，系统控制模型切换为特定模式下的控制模型[19]。系统控制模型见式(6)。

$$\boldsymbol{Z}_i = \boldsymbol{Z}_{0i} + \boldsymbol{T}\boldsymbol{\theta}_i \tag{6}$$

其中：$\boldsymbol{Z}$ 为控制后响应矩阵；$\boldsymbol{Z}_0$ 为控制前响应矩阵；$\boldsymbol{\theta}$ 为作动器输出力向量。

系统在正常状态和降级模式下为时间连续的非线性时变系统，作动器 j 失效下系统的 k 级降级控制模型的状态方程可以如式(7)描述。

$$\boldsymbol{T} = f(j,k) \tag{7}$$

在状态空间中，针对不同输出力配置组合存在不同状态变量使系统控制模型达到新的稳定状态，即当某个作动单元失效时，正常减振状态系统控制模型失效，系统进行降级模块判定，切换至新的控制模型即可使系统进入降级模式下的减振状态。

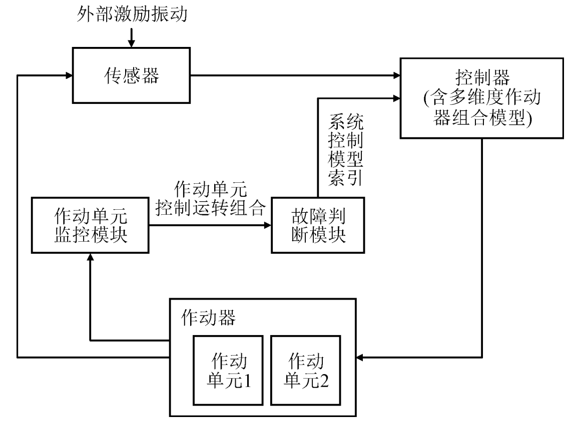


图 7　振动主动控制流程图

Fig. 7　Flow chart of the active vibration control system

为了保证状态方程中每个确定降级或正常状态下系统可达到理想的减振效果，需要对每个降级工作状态下的控制模型进行优化设计。采用多作动器组合优选设计方法[20]，以直升机桨毂载荷与作动器输出力单位载荷在有限元模型中计算得到的初级/次级传递函数为输入，以多作动器输出力与系统减振效率为优化目标，使用 MATLAB 多元函数工具进

行优化设计,得到不同降级模式作动器组合下使系统达到减振效率最优的作动器输出力方向组合,如图 8 所示。以不同作动器组合下的控制模型组合出系统的高维度控制模型矩阵。在系统控制时,通过图 7 中作动单元监控模块与故障判断模块进行系统控制模型的切换,以保证系统降级后性能的稳定性。

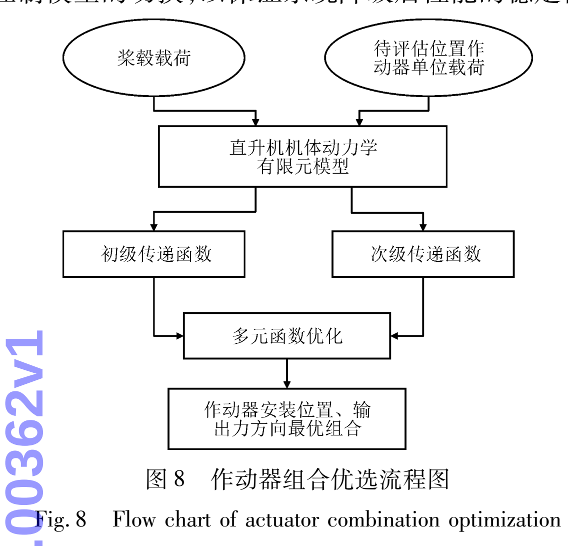


图 8　作动器组合优选流程图

Fig. 8　Flow chart of actuator combination optimization

在控制软件中对系统每一种降级模式下的控制模型 $\boldsymbol{T}$ 进行索引,在监控到作动器发生故障、作动器组合模式产生变化时,系统的控制模型切换至新的模型进行控制。系统的高维度控制模型 $\boldsymbol{T}$ 由不同等级的降级、不同作动器失效的降级所对应的系统控制模型组成,n 为作动器数量;$\boldsymbol{M}^{\mathrm{I}}$ 和 $\boldsymbol{M}^{\mathrm{II}}$ 为一级、二级降级模式下的系统全局控制模型,模型内元素 $\boldsymbol{T}_j^{\mathrm{I}}$ 为一级降级模式下第 j 个作动器失效时的控制模型,$\boldsymbol{T}_{ij}^{\mathrm{II}}$ 为二级降级模式时第 i、j 个作动器失效时的控制模型;t_{ks} 为第 k 个作动器对第 s 个传感器的传递函数;在 $\boldsymbol{T}_j^{\mathrm{I}}$ 和 $\boldsymbol{T}_{ij}^{\mathrm{II}}$ 中由方框圈住的 t_{ks} 为不同降级模式下在矩阵中删去的元素。

$$\boldsymbol{M}^{\mathrm{I}} = [\boldsymbol{T}_1^{\mathrm{I}} \quad \boldsymbol{T}_2^{\mathrm{I}} \quad \cdots \quad \boldsymbol{T}_n^{\mathrm{I}}] \tag{8}$$

$$\boldsymbol{T}_i^{\mathrm{I}} = \begin{bmatrix} t_{11} & \cdots & t_{1s} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \boxed{t_{i1}} & \boxed{\cdots} & \boxed{t_{is}} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ t_{n1} & \cdots & t_{ns} \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{M}^{\mathrm{II}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{T}_{12}^{\mathrm{II}} & \boldsymbol{T}_{13}^{\mathrm{II}} & \cdots & \boldsymbol{T}_{1n}^{\mathrm{II}} \\ 0 & \boldsymbol{T}_{23}^{\mathrm{II}} & \cdots & \boldsymbol{T}_{2n}^{\mathrm{II}} \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \boldsymbol{T}_{(n-1)n}^{\mathrm{II}} \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{T}_{ij}^{\mathrm{II}} = \begin{bmatrix} t_{11} & \cdots & t_{1s} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \boxed{t_{i1}} & \boxed{\cdots} & \boxed{t_{is}} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \boxed{t_{j1}} & \boxed{\cdots} & \boxed{t_{js}} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ t_{n1} & \cdots & t_{ns} \end{bmatrix} \tag{11}$$

4　试验验证

为了验证振动主动控制系统降级工作模式,在实验室内进行振动主动控制系统降级试验下减振性能测试。振动主动控制系统减振性能测试采用三入三出控制模型,使用 3 组作动器、3 个振动传感器组成试验系统进行减振控制,试验台振动源采用稳定输出的电磁激振器进行稳定频率的激振。

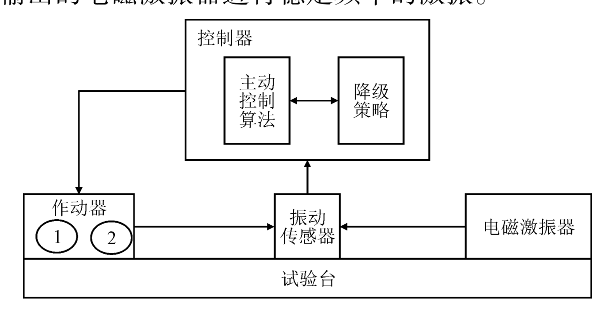


图 9　振动主动控制降级模式试验示意图

Fig. 9　Schematic diagram of degradation mode of the active vibration control

系统减振开启时,作动器输出控制力,被测传感器点的振动响应得到抑制,从数据可以看出,系统在正常工作状态下具有良好的减振性能,可实现 90% 以上的减振效率,如图 10 中实线框部分。

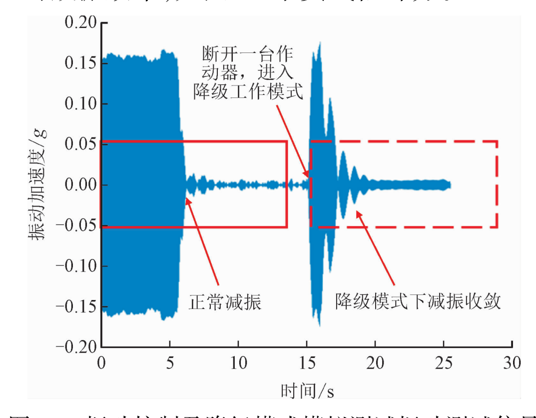


图 10　振动控制及降级模式模拟测试振动测试信号

Fig. 10　Test of degradation mode of the active vibration control system

chinaXiv:202303.00362v1

ChinaXiv合作期刊

系统正常运转状态下，通过断开部分作动器电源（或通讯），以模拟部分作动器出现故障场景。断开一台作动器通讯线缆后，系统监测到作动单元工作异常，转入一级降级工作模式，随即进入降级模式下的振动控制工作中，在一定时间内可以达到稳定状态，减振效率仍然可以达到 90% 以上，不丧失系统减振功能，如图 10 中虚线框部分。通过分析亦可看出，系统降级模式的收敛性与模型对系统减振控制的好坏、减振控制周期和减振收敛时间相关。

5 总 结

本研究针对某型振动主动控制系统，在不改变硬件的前提下，提出了基于作动器故障和基于总线监控的作动单元故障重置两种降级控制策略，两种降级策略下作动单元故障判断逻辑分别是串行模式和并行模式。通过对不同降级策略的仿真分析，对降级模式的试验验证可以得到以下结论。

1）采用降级模式的振动主动控制系统可很好地解决由部分作动单元失效所带来的系统功能失效影响，使系统以更高可靠度为装备提供减振功能。

2）对于硬件数量较多的系统，在未设计降级模式情况下，系统可靠性随着运转时间快速降低；基于总线监控的作动单元故障重置降级策略较基于作动器故障的降级策略对系统可靠度有明显的提升；在同一种降级策略下，设计有多级降级模式的系统较设计较少等级降级模式的系统可靠度有明显提升。

chinaXiv:202303.00336v1

参考文献：

[1] CRIBBS R, FRIEDMANN P P. Vibration suppression in helicopters with the ACSR approach using an improved control algorithm [C]//Proceedings of the 25th European Rotorcraft Forum. Roma: AIDAA, 1999.

[2] REICHRT G. Helicopter vibration control[C]//Proceedings of the Sixth European Rotorcraft and Powered Lift Aircraft Forum. Bristol: Conference Proceedings, 1980.

[3] BLACKWELL R, MILLOTT T. Dynamics design characteristics of the sikorsky X2 technology demonstrator aircraft[C]//Proceedings of the American Helicopter Society 64th Annual Forum. Montreal, Quebec: The Vertical Flight Society, 2008: 886-898.

[4] 中国直升机设计研究所，江西神州六合直升机有限责任公司. 用于直升机振动主动控制系统单向减振效率地面试验系统: CN201911227730.4[P]. 2021-09-21.

[5] 赵灿峰，顾仲权. 直升机结构振动频域主动控制的时域仿真[J]. 系统仿真学报，2009，21(20)：6347-6351.
ZHAO Canfeng, GU Zhongquan. Time-domain simulation of active control of structural response for helicopter in frequency domain [J]. Journal of system simulation, 2009, 21(20): 6347-6351 (in Chinese).

[6] 陆洋，顾仲权，凌爱民. 直升机结构响应主动控制中传感器优选问题研究[J]. 振动与冲击，2011，30(6)：58-61.
LU Yang, GU Zhongquan, LING Aimin. Optimization selection of sensors in active control of structural response for helicopter[J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30(6): 58-61 (in Chinese).

[7] 陆轶，顾仲权. 直升机结构响应主动控制作动器优化设计研究[J]. 振动与冲击，2007，26(3)：23-26.
LU Yi, GU Zhongquan. Study on optimal design of actuators for active control of structural responses of helicopter[J]. Journal of vibration and shock, 2007, 26(3): 23-26 (in Chinese).

[8] 李嘉全. 浮筏系统的振动主动控制技术研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2008.

[9] 浦玉学，张方，姜金辉. 变步长自适应结构振动主动控制算法[J]. 振动与冲击，2015，34(10)：199-205.
PU Yuxue, ZHANG Fang, JIANG Jinhui. A varying step adaptive algorithm for structural vibration active control[J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(10): 199-205 (in Chinese).

[10] YOUNG A J, HANSEN C H. Control of flexural vibration in a beam using a piezoceramic actuator and an angle stiffener[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 1994, 5(4): 536-549.

[11] 朱明刚. 船用柴油发电机组振动主动控制研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2012.

[12] 中国直升机设计研究所. 一种直升机舱内振动主动控制作动装置及直升机：CN201611072721.9[P]. 2020-04-03.

[13] 章志伟. 几类切换系统的容错控制[D]. 厦门：厦门大学，2014.

[14] 张永贤，邹力棒，吴文杰，等. 二乘二取二系统的一种新降级策略研究[J]. 华东交通大学学报，2017，34(5)：99-105.
ZHANG Yongxian, ZOU Libang, WU Wenjie, et al. New degradation strategy of double 2-out-of-2 system[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(5): 99-105 (in Chinese).

[15] 霍琳，费思邈. 基于遗传算法的飞行管理系统余度配置优化方法[J]. 北京航空航天大学学报，2017，43(7)：1306-1312.
HUO Lin, FEI Simiao. Flight management system redundancy optimization method based on genetic algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(7): 1306-1312 (in Chinese).

[16] 沈启坤. 基于自适应控制技术的故障诊断与容错控制研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2015.

[17] 陶元. 几类间歇故障的容错控制研究[D]. 北京：北京化工大学，2015.

[18] BRANICKY M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems[J]. IEEE transactions on automatic control, 1998, 43(4): 475-482.

[19] 陆洋，邓轲骞. 复杂外扰下直升机结构响应主动控制算法研究[J]. 计算机仿真，2012，29(12)：107-110.
LU Yang, DENG Keqian. Research on control algorithm of active control of structural response for helicopter under complex disturbances environment[J]. Computer simulation, 2012, 29(12): 107-110 (in Chinese).

[20] 中国直升机设计研究所. 一种直升机振动主动控制位置优选方法：CN201510205423.1[P]. 2019-03-29.

（编辑　黄崇亚　李坤璐）